第 37 卷第 19 期
2017 年 10 月

生　　态　　学　　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.19
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607071393

刘丹,于成龙.气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响.生态学报,2017,37(19):6511-6522.

Liu D, Yu C L.Effects of climate change on the distribution of main vegetation types in Northeast China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6511-6522.

气候变化对东北主要地带性植被类型分布的影响

刘　丹,于成龙*

黑龙江省气象科学研究所,哈尔滨　150030

摘要:准确地划分地带性主要植被类型分布的适宜区域,可为区域植被恢复与重建、生物多样性保护等工作提供有益的理论参考。在检验 1961—2013 年东北地区气候变化突变点的基础上,基于东北地区主要植被类型热量指标,研究气候变化对该区域主要植被类型适宜分布区域的影响,并利用 2000 年和 2013 年土地类型覆盖数据(MCD12Q1),对推算的适宜分布区域进行验证,结果表明:大兴安岭气温突变点为 1982 年,其它地区为 1988 年,东北地区各生态地理区年降水量没有明显的突变点。气温突变点后适宜在东北地区生长的主要植被种类没有变化,但各植被类型的分布区域均有所改变,其中高山冻原、亚高山矮曲林、寒温带针叶林和温带针阔叶混交林适宜分布区域面积减小,暖温带落叶阔叶林和温带草原面积增大。气温突变点前后各植被类型适宜分布区的地理中心均发生了不同程度的移动,其中移动距离最大的是南部地区的亚高山矮曲林,向东北方向移动了 135.44km。与主要植被类型实际分布相对比,证明气候变化对研究区植被类型分布可能已经产生了影响。

关键词:地带性植被;气候变化;东北地区;适宜分布区

Effects of climate change on the distribution of main vegetation types in Northeast China

LIU Dan, YU Chenglong*

Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China

Abstract: A suitable distribution of zonal vegetation types could provide a reference for the restoration and reconstruction of regional vegetation and protection of biodiversity. Between 1961 and 2013, we used mutation point detection and the thermal index to study the impacts of climate change on the distribution of the main vegetation types in Northeast China. The land cover data for 2000 and 2013 from NASA LPDAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center) EOS were used to verify the simulated distribution regions. The results showed that the temperature mutation point for Daxing'an Mountains was in 1982, and the mutation points for the other regions were in 1988. The annual precipitation at each eco-geographical region showed no obvious mutation. After 1982, the main vegetation types, which were suitable for growth, showed no obvious changes; however, their distribution regions had been changed. The areas of suitable distribution regions for alpine tundra, subalpine forest, cold-temperate coniferous forest, and temperate mixed forest decreased continuously; however, the areas for warm-temperate deciduous broad-leaved forest and temperate grassland increased. The geographic centers for the suitable distribution of each vegetation type had moved to different degrees before and after the temperature mutation points. Among them, the center of the subalpine forest had moved towards the northeast, and the distance was the longest (135.44km). On the basis of the comparative analysis, we concluded that climate change possibly had an impact on the distribution of vegetation types in Northeast China.

基金项目:2015 年中国气象局气候变化专项(CCSF201512);中国气象局沈阳大气环境研究所 2016 年开放基金课题(2016SYIAE11);2013 年公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306036)

收稿日期:2016-07-07;　　**网络出版日期**:2017-05-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: nefuycl@163.com

Key Words: zonal vegetation; climate change; Northeast China; suitable distribution

全球气候变化及其带来的影响已受到广泛关注,IPCC 第五次评估报告指出,2003—2012 年平均温度比 1850—1900 年上升了 0.78℃,而降水在地区和季节上的差异也有所增加,未来极端性天气气候事件的发生概率可能将进一步增加[1]。中国的气候变化与全球的变化趋势是一致的,平均增温速度高于全球或北半球同期,而北方和青藏高原尤为明显[2-3];降水趋势变化存在明显的区域差异[4-5],其中东北地区[6]和西部地区[7-8]的降水出现下降趋势。

气候作为生态系统演变的重要控制因子,它的任何变化都会对生态系统产生影响[9-10],进而对地带性植被的建群种分布产生影响[11-12],所谓地带性植被是指在分布上与气候带界线大体相符的大面积植被类型,它综合反映了各自的大气候特点和一定的生态地理空间[13-14]。有学者沿用 Kira 的温暖指数(WI)和寒冷指数(CI)划分地带性植被[15],有学者以 WI 为基础进行拓展[16],或在此基础上引入湿度指数(HI)[17],这些划分方法均是建立在气候是地带性植被类型分布的主要影响因子基础上的,因此对东北地区的划分基本一致,即东北地区的自然植被属欧亚森林、草原植物亚区和中国-日本森林植物亚区,主要地带性植被为寒温带针叶林、温带针叶混交林和暖温带落叶阔叶林。东北区地处全球气候变化的敏感区域,地域辽阔,地势复杂,气候变率大[18-19],因此许多学者就气候变化对该区域植被分布产生的影响做了一些研究,如冷文芳等[20]在模拟 100a 后气温和降水变化的基础上,使用 logistic 回归模型预测东北森林主要建群树种的空间分布变化,结果表明多数树种的覆盖率可能降低,只有红松、长白落叶松和蒙古栎有可能增加。程肖侠[21]也在预测模拟未来 100a 气候情景下东北地区森林类型的变化,认为气候变暖不利于东北主要森林类型的生长,主要的针叶树种比例可能会减少,阔叶树种比例会增加。以上研究均是建立在气候预测基础上的,但目前研究表明东北地区的气候变化已成不争的事实[22],这种变化对该区域森林主要建群树种的分布区域是否已经产生了影响,影响程度如何还少见报道,本研究正是针对这一问题,在总结前人研究成果的基础上,收集近十几年新增加的科研资料,根据东北地带性建群树种和常见种温暖指数范围,从生态气候学的角度探讨气候变化对东北三省森林植被地理分布的影响。该研究不仅有利于区域森林植被的恢复与重建,也可为该区域自然资源的合理利用、土地退化防治、生物多样性的保护等区域可持续发展战略和规划的制定提供理论参考。

1 研究区概况

东北三省包括黑龙江省、吉林省和辽宁省,位于 118.83°—135.09°E,53.56°—38.72°N 之间,南邻黄海和渤海,东面和北面有鸭绿江、图们江、乌苏里江和黑龙江环绕,西面与内蒙古接壤,总土地面积 78.7 万 km^2,境内有大、小兴安岭、长白山系和东北平原(包括松辽平原、辽河平原和三江平原),海拔高度在 2—2667m 之间。该地区属温带季风气候,其中北部大兴安地区属寒温带气候,其它地区属温带气候,年平均气温-4.15—10.99℃,年降水量 366.90—1080.47mm,日平均日照时数 5.22—8.10h。

2 数据来源与处理

2.1 地理信息数据

数字高程模型(DEM)为 SRTM 地形产品 V4.1 版本数据,空间分辨率为 90m,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gscloud.cn)。

研究所需的县级和省级行政区划数据来自于中国气象局下发的 1:25 万基础地理信息,对数据进行拓补检查,去除省界和县界的间隙。地面观测站位置数据为中国气象局下发的矢量数据。

2.2 土地覆盖类型数据

土地类型覆盖数据(MCD12Q1)来源于美国 NASA LPDAAC(The Land Processes Distributed Active Archive Center)EOS 数据中心,该数据的空间分辨率为 500m,是利用当年 Terra 和 Aqua 星观测所得的数据描述土地

覆盖类型,信息提取主要技术是监督决策树分类,产品包含 5 种不同土地覆盖分类方案的分类结果和对应的质量信息数据集,本研究选用"IGBP 的全球植被分类方案"的分类结果,该分类方案根据国际地圈生物圈计划(IGBP),本文所用数据的时间为 2001 年和 2013 年,空间范围为东北地区,利用 MODIS Reprojection Tool software(MRT)V4.0,进行影像的拼接、重采样(统一空间分辨率为 500m)和投影转换(由 Sinusoidal 投影转换为经纬度投影)等预处理。

2.3　气象数据

气象数据来源于黑龙江省、吉林省和辽宁省气象局的 1961—2013 年的 196 个气象台站逐日整编资料,包括日平均气温和日降水量,站点的地理位置和海拔高度如图 1。

2.3.1　气象数据预处理

气候变化研究必须建立在可靠的资料基础上,而由于气象台站迁移、观测数据误差和缺失、城市热岛效应等原因,会产生数据序列的不均一性,因此在进行分析之前需要对数据进行预处理,最大限度地降低因数据误差而影响分析结果的准确性。

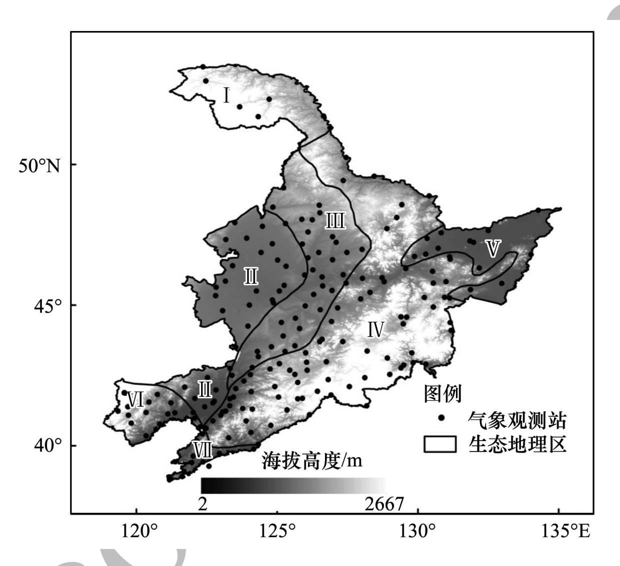


图 1　东北三省气象观测站和生态地理区分布示意图

Fig.1　Distribution diagram of meteorological observation stations and eco-geographical in the Northeastern China

Ⅰ:大兴安岭、Ⅱ:松辽平原中部、Ⅲ:东北东部山前平原、Ⅳ:东北东部山地、Ⅴ:三江平原、Ⅵ:华北山地丘陵、Ⅶ:辽东胶东山地丘陵

(1)质量控制

由于观测仪器、资料处理和传输过程可能引起误差,资料中很难避免存在一定的错误,最大限度地减少这些错误的可能影响是非常必要的[23],因此本研究采用翟盘茂[24]的方法对气象数据进行质量控制,删除错误数据。另外 Karl[25]也指出,把与时间有关的资料缺测假设为零时,会在气候变化趋势研究中引起误差,本研究中监测缺测数据的方法是当一年内缺测超过 20d(约大于一年内实际观测日数的 5%)时,该年的统计量被设为缺测,当 45a 序列中缺测总量超过 5a 时,则该测站被排除使用。

(2)正态分布检验

多数气候诊断方法和预测模型是在气候变量呈正态分布假定前提下进行的,所以对气候变量是否呈正态分布形态的检验是十分必要的。本文利用 SPSS 软件对各气候区逐日气温和相对湿度数据进行正态检验,显著性水平 sig.有 98.7%均≥0.05,说明各气候区逐日气温数据绝大多数近似正态分布,分析时可不对其进行标准化处理。与气温数据不同,日降水量的变化并不具有逐步的、连续的特征,因而判断降水数据是否服从正态分布是以月为自变量进行检验,检验结果绝大多数服从正态分布,因而分析时不作标准化处理。

(3)热岛效应分析

IPCC 第 3 次评估报告认为,从全球平均来看,城市化对地表平均气温记录的影响微乎其微,其实际作用要比观测到的增温值小一个数量级[26],而 Wang[27]和赵宗慈[28]却认为,热岛效应对长期气温序列研究的影响不容忽视,于是本研究根据 2015 年统计年鉴中人口数据,删除人口大于等于 100 万人和人口大于等于 50 万人的城市测站的气温观测数据,计算未删除、删除人口大于等于 100 万人城市和删除人口大于等于 50 万人的城市的年平均气温变化速率,结果分别为 0.0149、0.0126、0.0145℃/a,它们之间的差别比增温值(21 世纪以来比 19 世纪 60 年代高 0.16℃)小一个数量级,因此本研究不考虑城市热岛对气温序列变化的影响。

(4)数据插补

本文对缺测测站的气象数据采用 Newton 法进行插补。

2.3.2 气象数据突变检测

通过对东北地区 1961—2013 年气温和降水突变点的检验,为探寻气候变化对研究区主要地带性植被类型分布可能带来的影响提供时间节点。

(1) Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall(简称 MK)是气象学/气候学中经常用来进行突变检验的一种方法,具体方法如下:

设原始时间序列为 $y_1, y_2, \cdots, y_n$,m_i 表示第 i 个样本 y_i 大于 $y_j(1 \leqslant j \leqslant i)$ 的累积数,定义统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^{k} m_i (2 \leqslant k \leqslant n)$$

在原序列随机独立等假设下,d_k的均值和方差分别为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}$$

$$\mathrm{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$

将上面公式的 d_k标准化,得:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\mathrm{var}(d_k)}}$$

UF_k组成一条 UF 曲线,通过信度检验可得出其是否有明显的变化趋势。把此方法引用到反序列中,计算得到另一条曲线 UB,则两条曲线在置信区间内的交点确定为突变点。

(2)滑动 T 检验

滑动 t 检验法,它是用来检验两随机样本平均值的显著性差异[29]。为此,把一个长度为 n 的连续随机变量 x 分成两个样本子集 x_1和 x_2,让μ_i、S_{i2}和 n_i分别代表 x_i的平均值、样本方差和样本长度(i=1,2)。两样本子集始终间隔一个样本,这样检验的就是某一年后 n_2年和前 n_1年均值的显著性差异。

原假设 H_0:$\mu_1 - \mu_2 = 0$。定义 t 统计量为:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{S_P \left[\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

这里,S_P是联合样本方差,

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

为 σ_2的无偏估计($E[S_P{}^2] = \sigma^2$),显然 $t_0 - t(n_1 + n_2 - 2)$分布,给定信度 α,得到临界值 t_α,计算 t_0后在 H_0下比较 t_0与 t_α,当 $t_0 \geqslant t_\alpha$时,否定原假设 H_0,即说明其存在显著性差异。当$|t_0| < t_\alpha$时,则接受原假设 H_0。

用 MTT 来检验某一个时间序列,可以得到相应的 t_0统计量序列,峰值和谷值所对应的年份称之为突变年份、突变点或者过渡年份。

(3)累积距平检验

累积距平也是一种常用的、由曲线判断变化趋势的方法,对于序列 x,其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^{t} (x_i - \bar{x}) \quad (t = 1,2,3,\cdots,n)$$

其中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$

将 n 个时刻的累积距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。

3　结果与分析

3.1　气象数据突变检验

3.1.1　研究区划分

东北三省跨越寒温带、中温带和暖温带,且地形复杂,山地、丘陵和平原相间,海拔高度跨越 2665m,气候变化趋势和突变点可能会存在差异,因此本研究参照《中国生态区划研究》[30]提供的中国生态地理分区数据(来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)提供的矢量数据),分别检验东北三省的 7 个生态地理分区(图 1)的年平均气温和年降水量的突变点。

该生态地理分区数据是基于温度指标把全国划分为寒温带、中温带、暖温带、北亚热带等 11 个区域,根据干湿状况指标把全国划分为潮湿、湿润、半湿润、半干旱等 6 个区域,经上述 2 种指标组合后把全国划分成 46 个生态地理分区,东北三省占其中的 7 个生态地理分区(图 1)。

3.1.2　突变点检测

从年平均气温 MK 检验结果可见(图 2),东北三省 7 个生态地理分区的年平均气温均存在明显的上升趋势,其中生态地理区Ⅰ的 *UF* 和 *UB* 在 1982 年处交叉,表明从 1982 年开始该区的气温可能发生突变,同时滑动 T 检验结果和通过计算气温序列的累积距均显示 1982 年为该区气温突变年份;用同样的方法检测生态地理区Ⅱ—Ⅶ的气温突变年为 1988 年,该结论与[31]一致。

年降水量 MK 检验结果与年平均气温不同,生态地理区Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ和Ⅵ的 MK 降水量统计值 *UF* 在[-1.96, 1.96]波动,说明这几个生态地理区在研究时间段内年降水量无显著变化;生态地理区Ⅳ从 1976 年开始显著下降,1983 年开始显著上升;生态地理区Ⅶ从 1963 年开始下降,在 2003 年出现显著下降趋势。结合 MK 和滑动 T 检验结果,东北地区的 7 个生态地理区年降水量没有明显的突变点,因此本文只研究气温突变对东北地区地带性植被分布适宜区的影响。

3.2　气候变化对东北地带性植被分布的影响

3.2.1　植被分布热量指标 *WI*

按照徐文铎[17]的方法计算水热指标——温暖指数(*WI*):

$$WI = \sum_{i=1}^{12} (t - 5)$$

式中,t 为 5℃以上的月平均气温。

再根据树种的地理分布资料,按半峰宽(PWH)计算法[32]确定每个树种的热量分布范围:

$$\text{最适范围:}\begin{cases} \bar{X} - \frac{1}{2}\text{PWH} & \text{下限} \\ \bar{X} + \frac{1}{2}\text{PWH} & \text{上限} \end{cases}$$

$$\text{PWH} = 2.354S$$

式中,$\bar{X}$ 为热量指标的平均值,S 为标准差。这种确定方法能使树种约有 78%分布在最适热量范围之内[17]。表 1 为 6 个东北地带性植被建群种和常见种植被类型的 *WI* 范围。

3.2.2　WI 插值

把第 3.1.2 节气候突变点检测结果作为分界点,分别计算突变点前、后各个气象观测站点的 *WI* 平均值,即利用 1961—1981 年生态地理区Ⅰ和 1961—1987 年生态地理区Ⅱ—Ⅶ的数据计算突变点前每个站点 *WI* 的年平均值(WI_1);突变点后的 *WI* 的平均值(WI_2)所用数据的时间范围为 1982—2013 年生态地理区Ⅰ和 1988—2013 年生态地理区Ⅱ—Ⅶ的数据,计算方法同上。

由于东北三省的气象观测站点少且分布不均,尤其在地形复杂的山区气象观测站分布尤其稀疏,这些有限的气象观测站无法代表相距较远地区的气候状况,基于此数据计算的 *WI* 的代表性也会较差,为解决这一

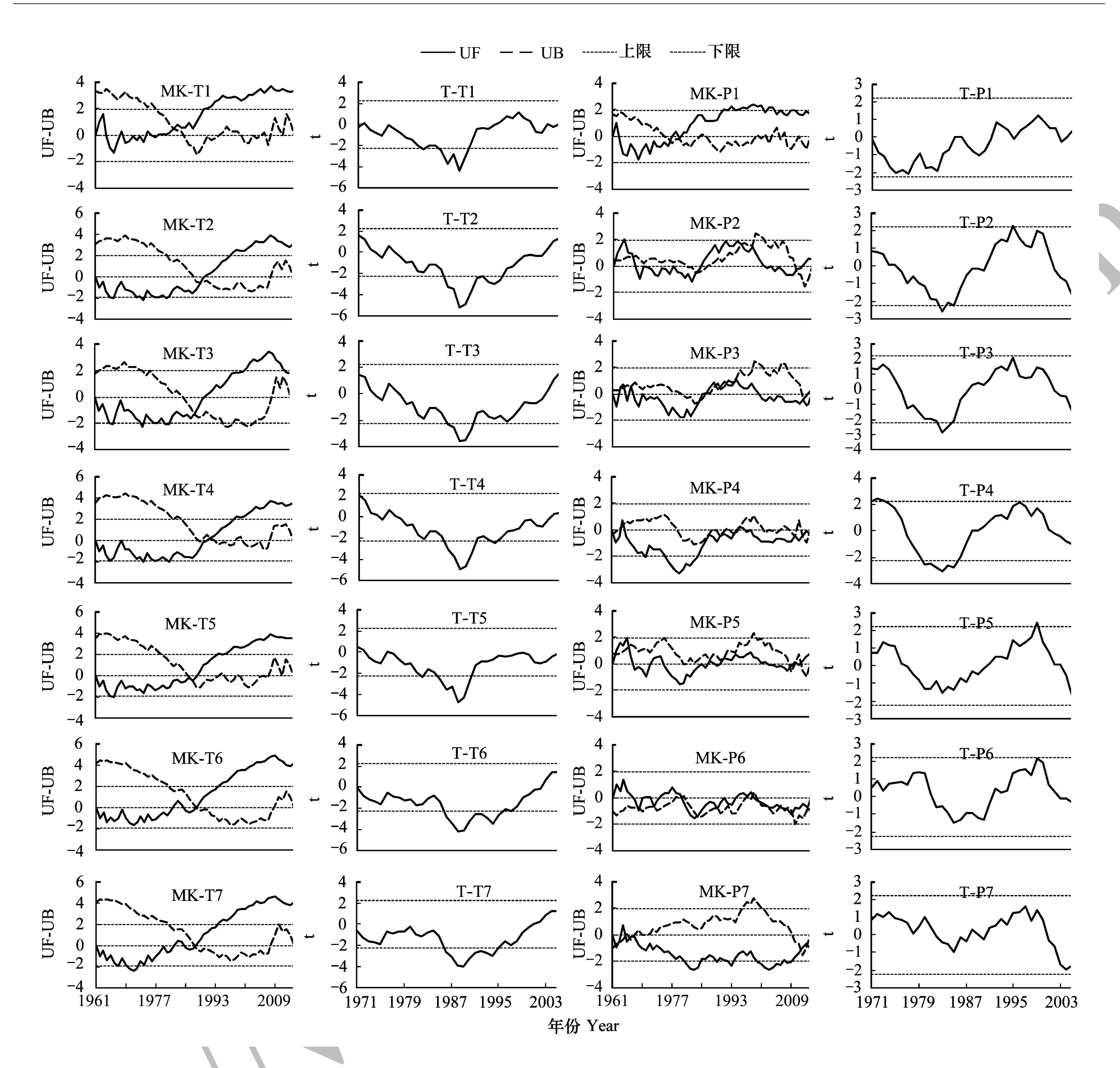


图 2　东北三省 1961—2014 年平均气温、年降水量 Mann-kendall 曲线和滑动 *T* 检验曲线

Fig.2　Statistics curves of Mann-kendall test and moving T-test of mean temperature and annual precipitation between 1961 and 2014 in Northeast China

MK-T1—MK-T7:第Ⅰ—Ⅶ生态地理分区气温的 MK 曲线图,T-T1—T-T7:第Ⅰ—Ⅶ生态地理分区气温的滑动 T 检验曲线图,MK-P1—MK-P7:第Ⅰ—Ⅶ生态地理分区降水的 MK 曲线图,T-P1—T-P7:第Ⅰ—Ⅶ生态地理分区降水的滑动 T 检验曲线图; MK 检验和滑动 T 检验的 α =0.05,其中滑动 T 检验的步长为 10a

问题,本研究对单点的 *WI* 数据进行插值,由于 *WI* 是基于气温计算而来,而气温与经度、纬度和海拔高度又具有较好的相关性[33-34],因此本研究以经度、纬度和海拔高度为自变量,分别以 WI_1 和 WI_2 为因变量拟合多元线性回归模型,拟合结果见表 2。

利用回归方程推算出各个观测站的 WI_1 和 WI_2 的拟合值,用拟合值减去实际计算值得到的差值分别记为 WI_{1a} 和 WI_{2a},再利用 IDW 插值方法把这些点的差值转换为面,用这个面数据作为订正系数来订正利用回归方程拟合出的 WI_1 和 WI_2 面数据,得到订正后的 WI_1 和 WI_2 的面数据,再从中提取各个观测点订正后的点数据,并减去实际计算值得到的差值分别记为 WI_{1b} 和 WI_{2b},分别统计对比 WI_{1a} 与 WI_{1b} 和 WI_{2a} 与 WI_{2b} 的标准误差、标准差和数值范围,结果表明,WI_{1b} 标准误差、标准差和数值范围分别比 WI_{1a} 小 0.13、1.77、6.82cm,WI_{2b} 标准误差、

标准差和数值范围分别比 WI_{2a} 小 0.12、1.57、7.83cm,说明经过订正后的 WI 值与实际计算值更为接近。

表 1　东北地带性植被的温暖指数范围[14]

Table 1　The Scope of warmth index for the zonal vegetation in Northeast China[14]

植被类型 vegetation types	建群种和常见种 Edificators and companions	WI 最适范围 The optimal range of WI/(℃·月)
高山冻原 Alpine tundra	牛皮杜鹃(*Rhododendron aureum*)、仙女木(*Dryasoctopetala*)、松毛翠(*Phyllodocecaerulea*)、圆叶柳(*Salix crenataHao*)	7—15
亚高山矮曲林 Subalpine forest	偃松(*Pinuspumila*)、岳桦(*Betulaermanii*)	15—35
寒温带针叶林 Cold-temperate coniferous forest	鱼鳞云杉(*Piceajezoen*)、红皮云杉(*PiceakoraiensisNakai*)、臭松(*Abiessibirica*)、兴安落叶松(*Larixgmelinii*)、樟子松(*Pinussylvestris*)	25—65
温带针阔叶混交林 Temperate mixed forest	红松(*Pinuskoraiensis*)、沙松(*Abiesholophylla*)、赤柏松(*Taxuscuspidata*)、鹅耳枥(*Carpinusturczaninowii*)、蒙古栎(*Quercusmongolica*)、紫椴(*Tiliaamurensis*)、黑桦(*Betuladavurica*)	45—75
暖温带落叶阔叶林 Tarm-temperate deciduous broad-leaved forest	辽东栎(*Quercuswutaishansea*)、槲栎(*Quercusaliena*)、栓皮栎(*Quercusvariabilis*)、赤松(*Pinusdensiflora*)、油松(*Pinustabulaeformis*)	55—95
温带草原 Temperate grassland	大针茅(*Stipagrandis*)、贝加尔针茅(*StipaBaicalensis*)、克氏针茅(*Stipakrylovii*)、羊草(*Leymuschinensis*)、线叶菊(*Filifoliumsibiricum*)	55—85

表 2　温暖指数回归方程

Table 2　Regression equation of warmth index

WI	回归方程 Regression equation	R	Sig.	RMSE	样本数 Sample number
WI_1	Y=346.804-1.313 log-2.346 lat-0.034 alt	0.961	0.000	3.24	209
WI_2	Y=353.006-1.350 log-2.248 lat-0.037 alt	0.951	0.000	3.72	209

Y: WI, log: 经度(°), lat: 纬度(°), alt: 海拔高度(m)

3.2.3　植被类型分布区域变化

分析图 3 可见,气温突变点前适宜在东北三省分布面积最大的是温带针阔混交林,为 55.89 万 km^2,主要分布于松嫩平原、辽河平原、三江平原、小兴安岭和长白山海拔小于 800m 左右的区域,在气温突变点后该植被类型的适宜分布面积为 47.22 万 km^2,总体适宜面积减少了 8.67 万 km^2,其中主要收缩区域为辽河平原,面积为 11.71km^2,扩张区域为大兴安岭东部和南部以及小兴安岭海拔在 400—500m 和长白山海拔在 800—1100m 的区域,面积为 3.04 万 km^2。

气温突变点后适宜分布面积增加的植被类型为暖温带落叶阔叶林和温带草原,其中暖温带落阔叶林在气温突变点前的适宜分布面积为 55.39 万 km^2,主要分布在除大兴安岭、小兴安岭和长白山海拔低于 600m 以下的其它区域,在气温突变点后适宜该植被类型分布的面积为 60.90 万 km^2,总体适宜面积增加了 5.51 万 km^2,成为东北地区适宜分布最广泛的植被类型,其中主要收缩的区域在东北南部沿海区域,面积为 1.62 万 km^2,扩张的区域在松嫩平原北部、小兴安岭海拔在 300—400m 和长白山海拔在 600—800m 之间的区域,面积为 7.13 万 km^2。

气温突变点后适宜分布面积减小最多的植被类型为寒温带针叶林,也是气温突变点前后适宜面积变化最大的植被类型。在气温突变点前适宜分布的面积为 46.54 万 km^2,主要分布在大兴安岭、小兴安岭、长白山、松嫩平原北部和三江平原大部,气温突变点后面积为 30.91 万 km^2,总体适宜面积减少了 15.63 万 km^2,其中主要收缩的区域在松嫩平原北部和三江平原大部,面积为 15.83 万 km^2,扩张的区域为大兴安岭海拔在 800m 以上的区域,面积仅有 0.20 万 km^2。

气温突变点后适宜分布面积增加最大的植被类型为温带草原,在气温突变点前适宜分布的面积为 50.47 万 km^2,主要分布在松嫩平原大部、辽河平原中部和北部、三江平原、长白山海拔低于 600m 以下的区域,在气

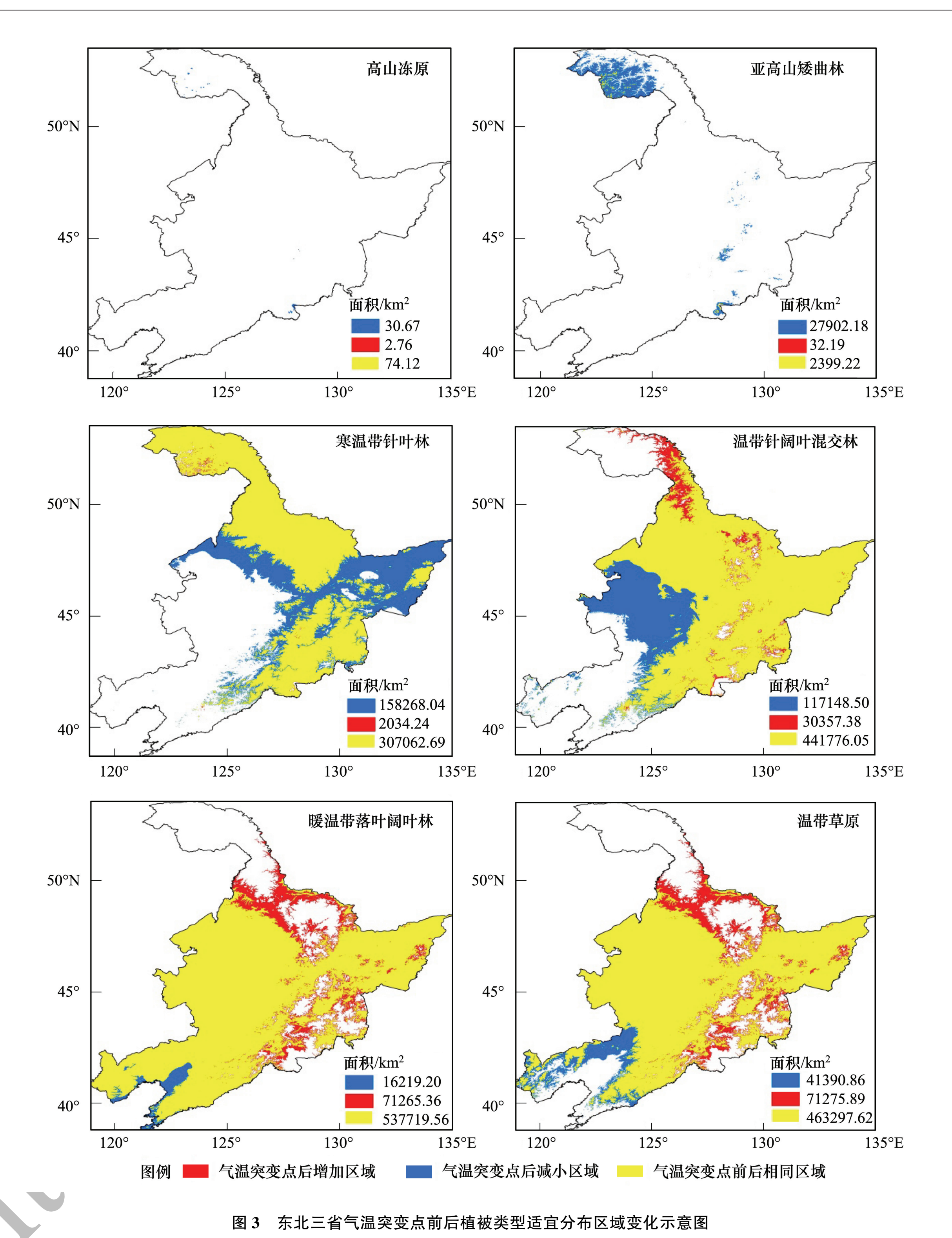


图 3　东北三省气温突变点前后植被类型适宜分布区域变化示意图

Fig.3　Change schematic of the distribution zone for zonal vegetation before and after temperature mutation points in Northeast China

温突变点后适宜该植被类型分布的面积为 53.46 万 km^2,总体适宜面积增加了 2.99 万 km^2,其中收缩的区域在辽河平原西部和北部、长白山南部,面积为 4.14 万 km^2,扩张的区域在小兴安岭海拔在 300—400m 和长白山海拔在 800—1100m 的区域,面积为 7.13 万 km^2。

高山冻原在东北地区适宜分布面积最小,主要分布在大兴安岭海拔在 900m 以上和长白山海拔在 1800m 以上的区域,气温突变点前的适宜分布面积为 104.79km^2,突变点后减小了 27.91km^2;亚高山矮曲林的分布面

积也较小,主要分布区域为大兴安岭海拔在 700—900m,气温突变点前的适宜分布面积为 3.03 万 km^2,突变点后面积减小为 2.79 万 km^2。

3.2.4　植被类型分布地理中心变化

气温突变点前后各植被类型分布的地理中心均发生了不同程度的移动(图 4),从移动方向上看,北部的高山冻原和寒温带针叶林向西北方向移动,其它植被类型分布的地理中心均向东北方向移动。从移动距离上看,最大的是南部地区的亚高山矮曲林,移动了 135.44km;其次是温带针阔叶混交林,移动了 71.80km;移动距离最小的是南部的高山冻原,只移动了 1.39km;其它植被类型的移动距离在 22.20—71.47km 之间。

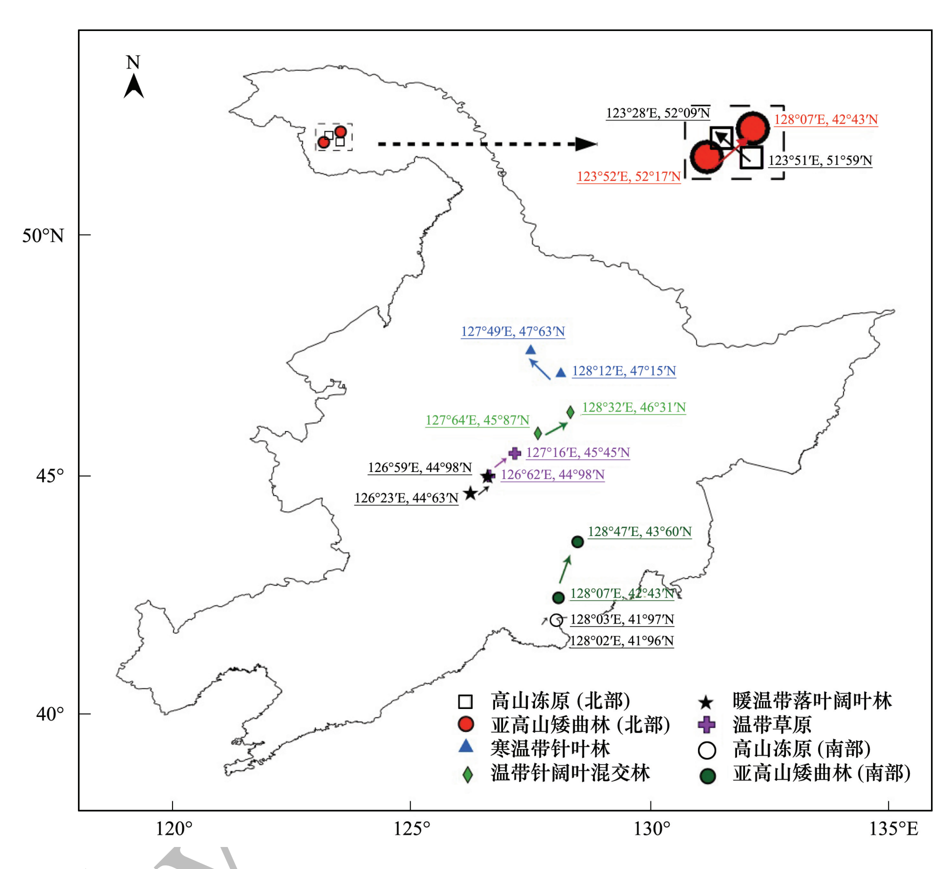


图 4　气温突变点前后植被类型分布区域中心转移示意图

Fig.4　The change of geographic center of the zonal vegetation before and after the temperature mutation points in Northeast China

3.2.5　推算分布区与实际分布区对比

由于本研究缺乏实地调查资料,因此借助 2001 年和 2013 年 MCD12Q1 数据的分类结果,与 3.2.2 中各植被类型的分布区域进行对比,在 MCD12Q1 数据的分类结果中落叶针叶林、混交林、落叶阔叶林和草地分别对应 3.2.2 中植被类型的寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林和温带草原。研究中首先利用 MCD12Q1 数据的分类结果提取 2013 年各土地覆盖类型与 2001 年的空间差异,增加部分的数据分别设为 A1、A2、A3 和 A4,减少部分的数据分别设为 B1、B2、B3 和 B4;再设 3.3.2 研究结果中各植被类型在突变点后增加部分的数据为 a1、a2、a3 和 a4,减少部分的数据分别设为 b1、b2、b3 和 b4,分别求取 A1 和 a1、…、A4 和 a4、B1 和 b1、…、B4 和 b4 的共同区域并计算面积。

结果表明(图 5),寒温带针叶林无共同减少区域;共同增加的区域分布在大兴安岭海拔在 800m 以上的地区,增加面积为 0.01 万 km^2,占 A1 面积的 4.82%,另外 82.57%的 A1 面积分布在气温突变点前后未变的适宜区域。温带针阔叶混交林无共同减少区域;共同增加的区域在大兴安岭东部、小兴安岭海拔在 400—500m 区域和长白山海拔在 800—1100m 的区域,增加面积为 1.27 万 km^2,占 A2 面积的 21.46%,另外 61.01%的 A2 面积分布在气温突变点前后未变的适宜区域;暖温带落叶阔叶林无共同减少区域;共同增加的区域在松嫩平原

北部、小兴安岭海拔在300—400m和长白山海拔在600—800m之间的地域,面积为0.78万km^2,占A3面积的20.23%,另外59.94%的A3面积分布在气温突变点前后未变的适宜区域;温带草原共同增加的区域在小兴安岭海拔在300—400m和长白山海拔在800—1100m的区域,面积为0.10万km^2,占A4面积的8.03%,另外80.15%的A4面积分布在气温突变点前后未变的适宜区域;共同减小的区域在辽河平原西部和北部以及长白山南部,占B4面积的18.72%,另外70.24%的B4面积分布在气温突变点后的不适宜区域。可见气候变化对各植被类型的分布已经产生一定影响。

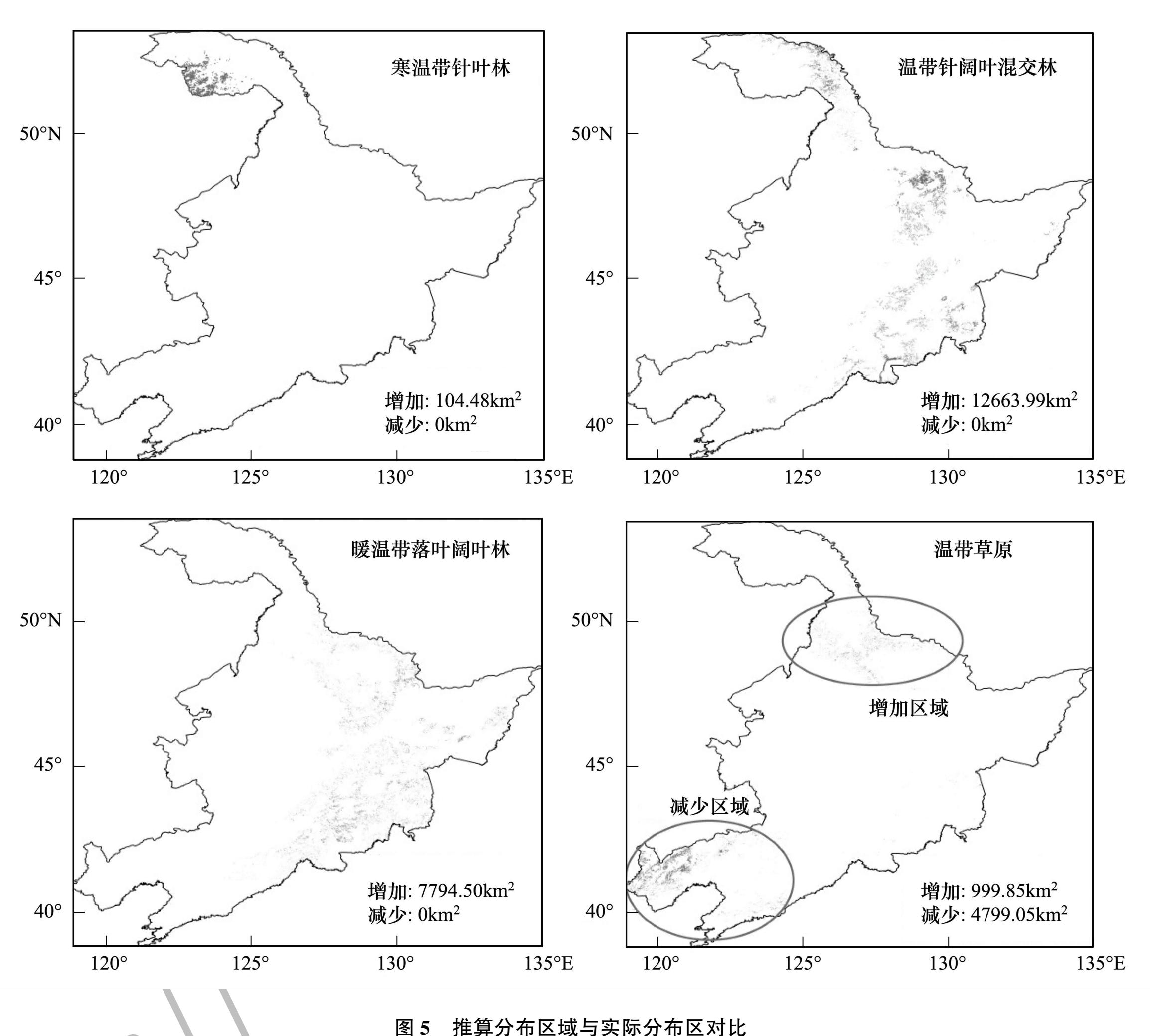


图5 推算分布区域与实际分布区对比

Fig.5 Comparison map between the projected distribution regions andactual distribution regions

4 结论与讨论

4.1 结论

以东北三省为研究区,以1961—2013年的196个气象台站逐日整编资料为基础数据,以温暖指数的适宜范围为标准,研究气候变化对东北地带性植被适宜分布区域的影响,并结合2000年和2013年土地类型覆盖数据(MCD12Q1),对推算适宜分布区域进行验证,结果表明:

(1)近50年来大兴安岭气温突变点为1982年,其它地区为1988年;东北三省年降水量没有明显的突变点。

(2)通过建立*WI*与经度、纬度和海拔高度的线性拟合方程,对缺少气温观测地区进行数据插补,再利用差值对插补数据进行订正,订正后的*WI*值与实际计算值更为接近。

(3)气温突变点后适宜东北三省生长的主要植被类型种类无变化,但各植被类型的适宜分布区域均发生

变化，气温突变点前适宜在东北三省分布面积最大的是温带针阔混交林，气温突变点后适宜分布面积有所下降，其中收缩的区域为辽河平原，扩大的区域为大兴安岭东部和南部以及小兴安岭海拔在400—500m和长白山海拔在800—1100m的区域；气温突变点后适宜在东北三省分布面积最大的是暖温带落阔叶林，其中的收缩的区域在南部沿海区域，扩大的区域在松嫩平原北部、小兴安岭海拔在300—400m和长白山海拔在600—800m之间的区域；气温突变点后面积减小最多的是寒温带针叶林，也是气温突变点前后适宜面积变化最大的植被类型；气温突变点后面积增加最大的是温带草原。

（4）与主要植被类型实际分布变化相对比，在寒温带针叶林、温带针阔混交林、暖温带落叶阔叶林和温带草原中，2013年比2001a增加的区域分别有4.82%、21.46%、20.23%和8.03%的面积落在理论推算的增加区域内，由此可见从理论推算和实际分布上均证明了气候变化对研究区主要植被类型分布可能已经产生了影响。

4.2　讨论

（1）本研究在检验近50年来气温突变点的基础上，推算气候变化对东北三省主要植被类型适宜分布区的影响，并选取典型植被类型利用现有的遥感分类数据进行对比，研究结果与已有的研究结论有很多一致之处，如程肖侠等[21]认为在维持当前气候条件不变的情况下，东北森林树种组成基本维持平衡，但气候增暖使主要针叶树种比例下降，阔叶树种比例增加，与本研究结论中气温突变点前后东部地区适宜在东北生长的主要植被类型种类无变化，但寒温带针叶林和温带针阔混交林在气温突变点后适宜分布区面积下降，暖温带落叶阔叶林适宜分布区面积增加的结论基本一致；在本研究中气温突变点后温带针阔叶混交林的适宜分布区域已经侵入大兴安岭东部，这一结论验证了程肖侠等[35]在研究大兴安岭森林演替中指出的气候变化将可能使大兴安岭会以温带针阔叶混交林为主的预测；冷文芳[20]在HADCM2SUL和CGCM1模型预测假设100a后全球平均气温和降水量增加的基础上，认为寒温带针叶林主要建群种（兴安落叶松和云冷衫）的覆盖率有明显下降，这一结论与本研究结果一致，但对于本研究中的温带针阔混交林的主要树种红松，本研究的结论更倾向于CGCM1方案的预测结论；晏寒冰[36]等认为气候变化使兴安落叶松和白桦的分布向西北漂移，这与本研究中寒温带针叶林适宜分布区域的地理中心向西北移动的结论一致。

（2）本研究得出的气候变化对研究区主要植被类型分布可能已经产生了影响的结论，是在理论推算和遥感分类数据相结合的基础上得出的，这当中主要误差来源有：一是理论推算方面，本研究推算气候变化对植被类型分布的影响是建立在气候变化突变点基础上的，气候变化突变检验的结果是近50年来只有温度因子发生了突变，因此认为温度因子在其中起了主要作用，尽管在本研究中已检测到降水无显著变化，但降水、自然灾害、人为活动等诸多因素对植被类型分布也具有一定的影响，因此本研究得出的结论具有一定的片面性，但方精云[37]和邹春静等[38]认为，单因素标准对于确定大区域植被带划分具有较好的指示意义，而且刘向培[39]的研究结果表明，在东北地区温度对地表植被动态变化的影响大于降水，因此本研究只根据温度因素推算气候变化对植被类型分布的结果仍具有一定的参考意义；二是遥感分类数据的精度问题，本研究直接采用了美国NASA LPDAACEOS数据中心提供的土地类型覆盖数据（MCD12Q1），由于缺乏历史地面调查数据，因此无法对其分类精度进行检验，分类误差也会影响本研究结果准确程度，虽然在讨论①中已有相关研究成果支持了本研究的结论，但本研究给出的每种植被类型分布区域变化的具体数据还有待进一步验证。

（3）虽然物种分布与气候因素有密切关系，但物种的迁移对于气候变化的影响往往有一定的滞后性[40]，也会受到自身的迁移能力、人为干预和诸多外界条件的影响，而本研究在推算植被类型分布适宜区域变化时并未考虑上述因素的影响，这也是把推算结果与植被类型实际分布变化作对比时，共同增加（减少）面积占实际增加（减少）面积比例较低的原因之一。

参考文献（References）：

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1-1552.

[2] 丁一汇，任国玉，石广玉，宫鹏，郑循华，翟盘茂，张德二，赵宗慈，王绍武，王会军，罗勇，陈德亮，高学杰，戴晓苏. 气候变化国家评估报告(Ⅰ)：中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展，2006，2(1)：3-8.

[3] 翟盘茂，邹旭恺. 1951-2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展，2005，1(1)：16-18.

[4] 卢爱刚. 1951-2002 年中国降水变化区域差异. 生态环境学报，2009，18(1)：46-50.

[5] 蔡榕硕，谭红建，黄荣辉. 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系. 大气科学，2012，36(1)：35-46.

[6] 贺伟，布仁仓，熊在平，胡远满. 1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报，2013，33(2)：519-531.

[7] 杜华明，延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应. 资源科学，2013，35(12)：2491-2500.

[8] 常学礼，赵学勇，王玮，刘良旭. 科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应. 生态学报，2013，33(21)：7002-7012.

[9] Piekielek N B，Hansen A J，Chang T. Using custom scientific workflow software and GIS to inform protected area climate adaptation planning in the Greater Yellowstone Ecosystem. Ecological Informatics，2015，30：40-48.

[10] Pandey R K. Impact of climate change on forest ecosystem servicesvisa vis sustainable forest resource management. Journal of Tropical Forestry，2015，31(2)：1-9.

[11] Chen P Y，Welsh C，Hamann A. Geographic variation in growth response of Douglas-fir to interannual climate variability and projected climate change. Global Change Biology，2010，16(12)：3374-3385.

[12] Bugmann H K M，Solomon A M. Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. Ecological Applications，2000，10(1)：95-114.

[13] 徐文铎，邹春静，卜军. 全球变暖对中国东北植被的影响及对策. 地理科学，1996，16(1)：26-36.

[14] 徐文铎. 东北主要树种的分布与热量关系的初步研究. 东北林学院学报，1982，(4)：1-10.

[15] 方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. 生态学报，1991，11(4)：377-387.

[16] 倪健. KIRA 指标的拓展及其在中国植被与气候关系研究中的应用. 应用生态学报，1997，8(4)：161-170.

[17] 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系. 植物生态学与地植物学学报，1986，10(4)：254-263.

[18] 赵东升，吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. 地理学报，2013，68(5)：602-610.

[19] 郝成元，赵同谦. 中国气候变化敏感区降水量区域对比——以黑龙江、新疆和西藏三省区为例. 地理科学进展，2011，30(1)：73-79.

[20] 冷文芳，贺红士，布仁仓，胡远满. 气候变化条件下东北森林主要建群种的空间分布. 生态学报，2006，26(12)：4257-4266.

[21] 程肖侠，延晓冬. 气候变化对中国东北主要森林类型的影响. 生态学报，2008，28(2)：534-543.

[22] 付长超，刘吉平，刘志明. 近 60 年东北地区气候变化时空分异规律的研究. 干旱区资源与环境，2009，23(12)：60-65.

[23] 任福民，翟盘茂. 1951-1990 年中国极端气温变化分析. 大气科学，1998，22(2)：217-227.

[24] 翟盘茂，任福民. 中国近四十年最高最低温度变化. 气象学报，1997，55(4)：418-429.

[25] Karl T R，Knight R W，Easterling D R，Quayle R G. Indices of climate Change for the United States. Bulletin of the American Meteorological Society，1996，77(2)：279-292.

[26] IPCC WG Ⅲ. Third Assessment Report (Climate Change 2001：Impact，Adaptation and Vulnerability)：Summary for Policymakers. 2001.

[27] Wang W C，Zeng Z M，Karl T R. Urban heat islands in China. Geophysical Research Letters，1990，17(13)：2377-2380.

[28] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. 气象，1991，17(4)：14-17.

[29] 朱锦红，王绍武. 年代际气候变率. 见：王绍武. 现代气候学研究进展. 北京：气象出版社，2001：348-370.

[30] 傅伯杰，刘国华，欧阳志云. 中国生态区划研究. 北京：科学出版社，2013，1-256.

[31] 李叶妮，孙卫国，朱红，赵晓川，白杨，张运芝. 我国东北地区主要城市气温和降水量序列的多尺度分析. 科学技术与工程，2015，15(9)：23-31.

[32] 洪必恭，李绍珠. 江苏主要常绿主要阔叶树种的分布与热量关系的初步研究. 生态学报，1981，1(2)：105-111.

[33] Hutchinson M F. A new objective method for spatial interpolation of meteorological variables from irregular networks applied to the estimation of monthly mean solar radiation，temperature，precipitation and Windrum //Fitzpatrick E A，Kalma J D，eds. Need for Climatic and Hydrological Data in Agriculture in South-East Asia. Proceedings of the United Nations University Workshop. Canberra，Australia：CSIRO，Division of Water Resources，1989：95-104.

[34] Prihodko L，Goward S N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. Remote Sensing of Environment，1997，60(3)：335-346.

[35] 程肖侠，延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响. 生态学杂志，2007，26(8)：1277-1284.

[36] 晏寒冰，彭丽潭，唐旭清. 基于气候变化的东北地区森林树种分布预测建模与影响分析. 林业科学，2014，50(5)：132-139.

[37] 方精云.也论我国东部植被带的划分. 植物学报，2001，43(5)：522-533.

[38] 邹春静，徐文铎. 中国东北植被生态学研究中的焦点问题. 应用生态学报，2004，15(10)：1711-1721.

[39] 刘向培，刘烈霜，史小康，佟晓辉，贾庆宇. 中国东北植被动态变化及其与气候因子的关系. 大气科学学报，2015，38(2)：222-231.

[40] 刘国华，傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报，2001，16(1)：71-78.